ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 621.94

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Научная статья

Технические решения по снижению величины проскока пылевых частиц при очистке выбросов производства железобетонных изделий пылеуловителями со встречными закрученными потоками

Б.Ч. Месхи[1], **А.И. Евтушенко**[1] ✉, **Д.П. Боровков**[2]

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

✉ a.evtushenko@mail.ru

Аннотация

Введение. Производство железобетонных изделий, будучи основой современного индустриального строительства, является весьма существенным источником пылевых выбросов. Традиционные методы очистки зачастую неспособны обеспечить соблюдение требований к качеству воздушной среды, а замена их более современными требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы является применение нового класса инерционных пылеуловителей со встречными закрученными потоками, сочетающими конструктивную простоту и низкие эксплуатационные затраты с достаточно высокой эффективностью работы. Целью работы был анализ факторов, оказывающих влияние на величину коэффициента проскока мелкодисперсных пылевых частиц, а также разработка конструктивных решений, направленных на его снижение.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор технических решений, направленных на снижение величины проскока, на основании которых разработаны конструкции нижнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками. Для подтверждения эффективности разработанных конструкций применялись методы вычислительного эксперимента и натурные замеры.

Результаты исследования. Посредством проведения численных экспериментов получены сведения об аэродинамической картине течения в сепарационной камере пылеуловителя ВЗП, а также произведена оценка величины проскока пылевых частиц. Разработаны решения по конструктивному оформлению нижнего коаксиального ввода закрученного потока пылеуловителей на встречных закрученных потоках, учитывающие особенности пылевых загрязнений, образующихся при работе технологического оборудования железобетонного производства.

Обсуждение и заключение. Было установлено наличие смещения оси вторичного закрученного потока от оси симметрии сепарационной камеры. Следствием этого является некоаксиальность первичного и вторичного потоков, приводящая к снижению интенсивности закрутки, образованию паразитных вихрей, и, как следствие, увеличению значения коэффициента проскока. Особенно сильно данный эффект проявляется при большой доле мелкодисперсных пылевых частиц, характерной для пылевых загрязнений, образующихся при производстве железобетонных изделий. Предложенная конструкция коаксиального ввода вторичного закрученного потока снижает величину данного эксцентриситета, что позволяет достигать существенного снижения величины проскока мелкодисперсных частиц, характерных для пылевых выбросов железобетонных производств. Полученные результаты могут быть эффективно использованы как в производстве железобетонных изделий, так и в других отраслях строительного производства, для которого характерно интенсивное образование мелкодисперсных пылевых выбросов.

Ключевые слова: пылеуловитель со встречными закрученными потоками, коэффициент проскока частиц пыли, предприятия по производству железобетонных изделий и конструкций

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Месхи Б.Ч., Евтушенко А.И., Боровков Д.П. Технические решения по снижению величины проскока пылевых частиц при очистке выбросов производства железобетонных изделий пылеуловителями со встречными закрученными потоками. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Original article

Technical Solutions to Reduce the Amount of Dust Particle Breakthrough when Cleaning Emissions from the Production of Reinforced Concrete Products Using Dust Collectors with Counter Swirling Flows

Besarion Ch. Meskhi[1], **Aleksandr I. Evtushenko**[1] ✉, **Dmitry P. Borovkov**[2]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

✉ a.evtushenko@mail.ru

Abstract

Introduction. The production of reinforced concrete products, being the basis of modern industrial construction, is a very significant source of dust emissions. Traditional cleaning methods are often unable to ensure the compliance with air quality requirements, and replacing them with more modern ones requires significant capital and operational costs. One of the most promising ways to solve the problem is the use of a new class of inertial dust collectors with counter swirling flows, combining constructive simplicity and low operating costs with sufficiently high work efficiency. The aim of the work was to analyze the factors influencing the magnitude of the breakthrough coefficient of fine dust particles, as well as the development of constructive solutions aimed at reducing it.

Materials and Methods. An analytical review of technical solutions aimed at reducing the breakthrough magnitude was carried out, on the basis of which the designs of the lower input of dust collectors with counter swirling flows were developed. Methods of computational experiment and field measurements were used to confirm the effectiveness of the developed structures.

Results. By means of numerical experiments, the information about the aerodynamic flow pattern in the separation chamber of the CSF dust collector was obtained, and the breakthrough magnitude of dust particles was estimated. The solutions were developed for the design of the lower coaxial input of the swirling flow of dust collectors on the counter swirling flows, taking into account the features of dust pollution generated during the operation of technological equipment of reinforced concrete production.

Discussion and Conclusion. The presence of a displacement of the axis of the secondary swirling flow from the axis of symmetry of the separation chamber was established. The consequence of this was the non-coaxiality of the primary and secondary flows, which led to a decrease in the intensity of the twist, the formation of parasitic vortices, and, as a consequence, an increase in the value of the breakthrough coefficient. This effect was especially pronounced with a large proportion of fine dust particles, characteristic of dust pollution formed during the production of reinforced concrete products. The proposed design of the coaxial input of the secondary swirling flow reduced the magnitude of this eccentricity, which made it possible to achieve a significant reduction in the breakthrough magnitude of fine particles characteristic of dust emissions of reinforced concrete industries. The results obtained can be effectively used both in the production of reinforced concrete products and in other branches of construction production, which is characterized by intensive formation of fine dust emissions.

Keywords: dust collector with counter swirling flows, dust particle breakthrough coefficient, enterprises for the production of reinforced concrete products and structures

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Meskhi BCh, Evtushenko AI, Borovkov DP. Technical Solutions to Reduce the Amount of Dust Particle Breakthrough when Cleaning Emissions from the Production of Reinforced Concrete Products Using Dust Collectors with Counter Swirling Flows. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Введение. Конструкций пылеулавливающих аппаратов пылегазоочистки постепенно усложняются [1–5], что сопровождается повышением затрат на их производство. Данное обстоятельство затрудняет широкое применение пылеуловителей новых типов: аппаратов мокрой очистки, электрофильтров, тканевых фильтров различных типов. Современные требования в области чистоты воздушной среды требуют расширения применения пылеулавливающих аппаратов и повышения эффективности их работы [6]. Перспективным путем разрешения данного противоречия является совершенствование инерционных методов пылеулавливания, характеризующихся конструктивной простотой и дешевизной эксплуатации. Одним из направлений развития инерционных способов пылеулавливания являются пылеуловители на встречных закрученных потоках (далее ВЗП). Их главным достоинством являются более низкие, по сравнению с циклонами, значения коэффициента проскока пыли, устойчивость работы и простота конструкций [6]. Однако распространение данного вида пылеуловителей сдерживается недостаточным объемом информации эффективности применения в конкретных областях промышленного производства. Помимо этого, существует большое разнообразие конструктивных схем подобных аппаратов, каждый из которых требует тонкой настройки в условиях конкретного технологического процесса. Поэтому разработка технических решений для адаптации пылеуловителей на встречных закрученных потоках является актуальной задачей.

Существует два основных типа пылеуловителей на встречных закрученных потоках. К первому типу относятся аппараты, в которых для создания вторичного закрученного потока используется сжатый воздух. Вход, через который подается сжатый воздух, располагается сверху и называется вторичным. Ко второму типу относят аппараты, созданные на базе циклонов [6–8]. Основное отличие аппаратов ВЗП от циклонов состоит в том, что к обычному верхнему входу добавляется нижний вход. На описываемые конструкции в 1953 году был получен патент (рис. 1) Е. Шауфлера и Х. Ценнека [9].

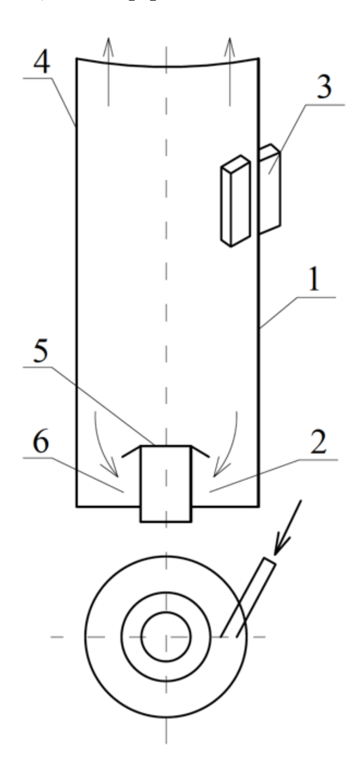


Рис. 1. Вихревая камера для отделения твердых и жидких аэрозольных частиц с помощью вспомогательного закручивающего потока газа: 1 — сепаратор; 2 — ввод первичного потока; 3 — сопло для вторичного потока; 4 — выхлопная труба; 5 — отбойная шайба; 6 — бункер для сбора пыли [10]

В 1972 году были предложены конструкции ВЗП соплового (рис. 2 *а*) и лопаточного (рис. 2 *б*) типов [6].

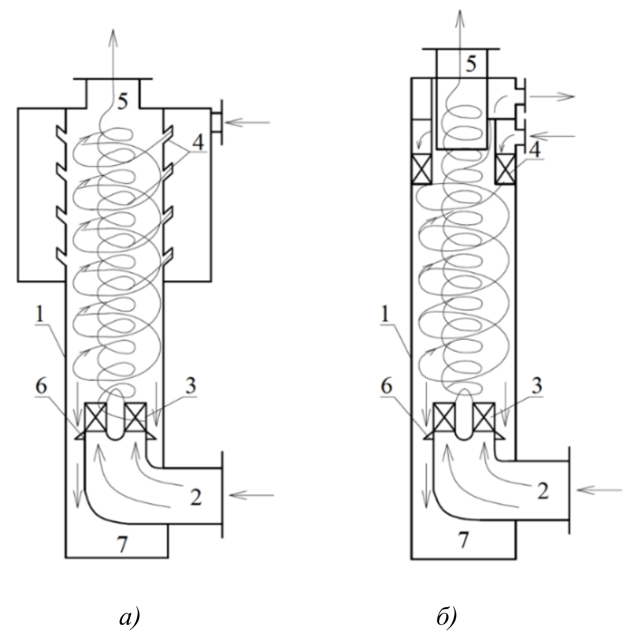


Рис. 2. Вихревые пылеуловители: *а* — соплового типа: 1 — камера; 2 — входной патрубок; 3 — лопаточный завихритель типа «розетки»; 4 — сопла; 5 — выходной патрубок; 6 — подпорная шайба; 7 — пылевой бункер; *б* — лопаточного типа: 1 — камера; 2 — входной патрубок; 3 — лопаточный завихритель типа «розетки»; 4 — кольцевой лопаточный завихритель; 5 — выходной патрубок; 6 — подпорная шайба; 7 — пылевой бункер [10]

Исключение инерционных пылеуловителей из компоновочных схем систем очистки, как и применение циклонов устаревшей конструкции в качестве первой ступени, негативно сказывается на ресурсе, энергоэффективности и эксплуатационных расходах. Пылеуловители на встречных закрученных потоках, ввиду повышенной эффективности сепарирования частиц средних и мелких фракций, могут существенно разгружать более дорогостоящее и энергоемкое пылеулавливающее оборудование, повышая эксплуатационные характеристики систем очистки выбросов и снижая стоимость их эксплуатации.

В настоящее время изучение аппаратов ВЗП и их внедрение в различные производства ведутся несколькими научными коллективами России. В работах В.Н. Азарова, С.А. Кошкарева, Н.М. Сергиной, Д.П. Боровкова и др. был предложен ряд конструктивных изменений в аппаратах ВЗП, а также разработаны различные схемы систем пылеочистки, в которых используются циклоны, ВЗП и рукавные фильтры [6]. Например, для повышения надежности эксплуатации аппаратов ВЗП, в том числе на заводах ЖБИиК, предложено в ряде конструкций закручиватель нижнего входа выносить за пределы аппаратов [6, 11]. Кроме того, разработан ряд аппаратов с несколькими верхними входами, например, коллекторы-пылеуловители (рис. 3) [6].

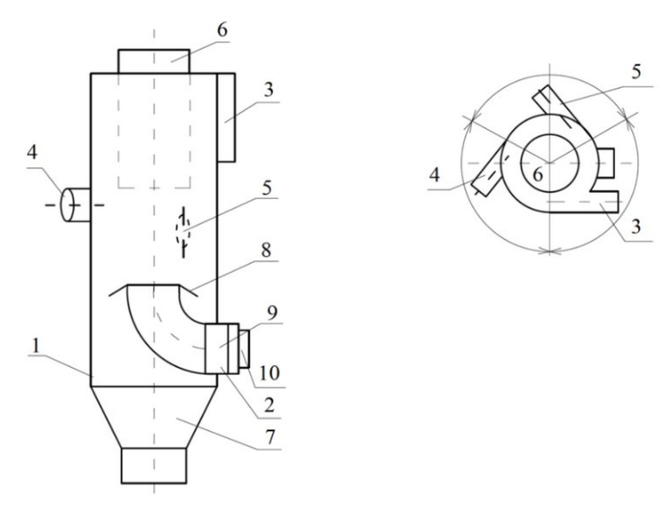


Рис. 3. Схема коллектора-пылеуловителя КП-ВЗП: 1 — корпус; 2 — ввод вторичного запыленного потока; 3, 4, 5 — вводы первичного запыленного потока; 6 — патрубок вывода очищенного воздуха; 7 — пылесборник; 8 — отбойная шайба; 9 — завихритель; 10 — люк для прочистки [10]

Работы Е.И. Богуславского, В.Н. Азарова и др. посвящены стохастическим моделям расчета ВЗП [6, 11]. В работах [12–15] проведены расчеты фракционной эффективности аппаратов ВЗП с использованием современных программных комплексов.

Как следует из анализа литературных источников по данной теме, в настоящее время конструктивные схемы пылеуловителей ВЗП различаются в основном типом ввода вторичного потока (с внешним и внутренним закручивателем), а основные усилия исследователей направлены на изучение аэродинамических параметров и создание расчетных методик. Однако, именно в совершенствовании конструктивного исполнении вторичного ввода кроется резерв, позволяющий снизить значение коэффициента проскока. Основной особенностью, характерной для пылевых частиц, образующихся при производстве железобетонных изделий, является их мелкодисперсность [16, 17]. Частицы мелких фракций в большей степени склонны к проскоку, особенно в условиях недостаточной интенсивности закрутки вторичного потока. Одним из факторов, влияющих на интенсивность закрутки является геометрическая конфигурация вторичного ввода, вносящая серьезные искажения в кинематическую структуру течения в нижней области сепарационной камеры пылеуловителей ВЗП [17]. Помимо снижения общей интенсивности закрутки потока, при взаимодействии его с патрубком вторичного ввода возникают нежелательные паразитные завихрения, способные вызвать унос уже уловленных пылевых частиц [18].

Целью данного исследования стал анализ факторов, оказывающих определяющее влияние на величину коэффициента проскока мелкодисперсных пылевых частиц железобетонного производства и разработка соответствующих конструктивных решений по конструктивному оформлению нижнего ввода закрученного потока пылеуловителей ВЗП.

Материалы и методы. Изучение параметров движения пылевоздушной смеси в нижней части сепарационной камеры пылеуловителя со встречными закрученными потоками осуществлялось посредством вычислительного эксперимента. Кинематическая модель движения газового в объеме сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках, реализованные при помощи численного решения уравнений Навье-Стокса и неразрывности, замкнуты при помощи k-ε модели турбулентности в приложении COSMOSFlowWorks для программного обеспечения SolidWorks.

Для решения поставленной задачи были построены модели пылеуловителя ВЗП нескольких типоразмеров, имеющие стандартную обвязку. Размеры основных элементов вихревого пылеуловителя приняты типичными для серий вихревых пылеуловителей ВЗП и ВИП. В качестве прототипов при построении моделей использованы пылеуловители, имеющие диаметры сепарационных камер 160, 350 и 700 мм. Схема расчетной модели приведена на рис. 4 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks). На первом этапе для привязки математической модели к конкретной задаче и к расчетной области задавались начальные и граничные условия.

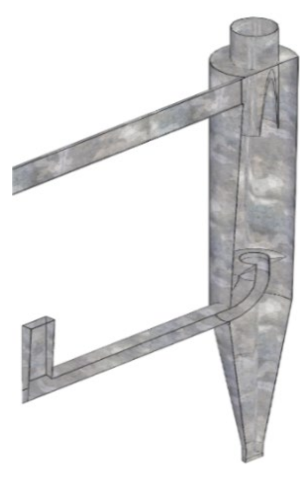


Рис. 4. Схема расчетной модели вихревого пылеуловителя

План проведения экспериментальных исследований включал три серии опытов, проводимых для разных значений расхода потока, подаваемого во входное сечение нижнего закручивателя (зона В) (рис. 5).

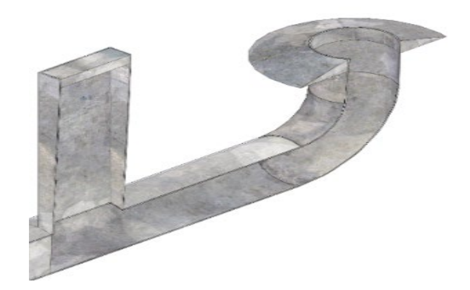


Рис. 5. Сечение нижнего входного патрубка вторичного пылегазового потока пылеуловителя ВЗП

Схема определения конструктивных параметров нижнего ввода приведена на рис. 6 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks).

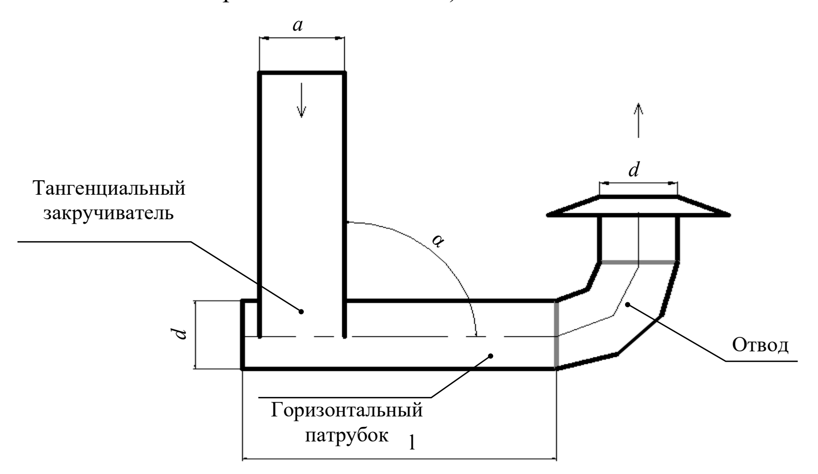
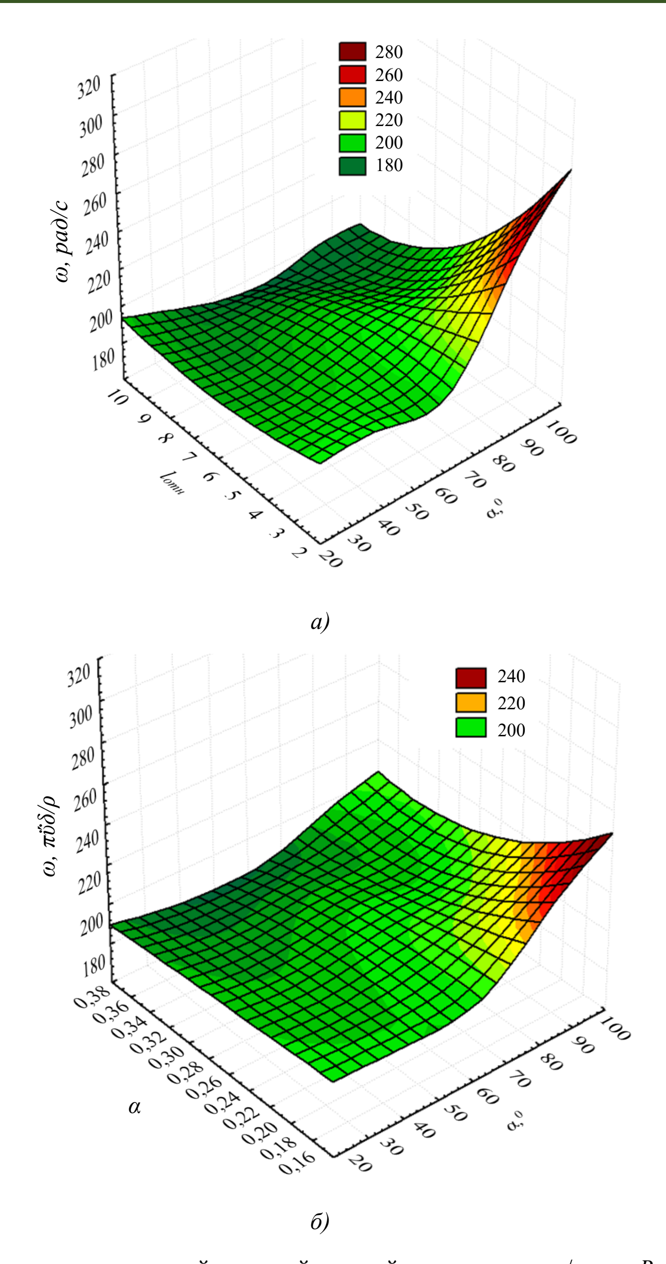


Рис. 6. Характерные конструктивные размеры закручивателя вторичного потока ВЗП:
l — длина патрубка закрученного потока, отнесенная к диаметру (*d*);
a — относительная ширина тангенциального патрубка, отнесенная к диаметру (*d*);
α — угол ввода тангенциального патрубка

После вычислений значений скоростей газового потока, характеризующих поле течения в расчетных сечениях, производились вычисления траекторий пылевых частиц фракций, характеризуемых значениями эквивалентных диаметров пылевых частиц $d_ч$ = 10–100 мкм. Исходя из полученных результатов, вычислялась доля количества частиц, поступающих в объем сепарационной камеры вихревого пылеуловителя через верхний и нижний вводы. Также для аэродинамических режимов, заданных диапазоном значений среднерасходовых по сечению сепарационной камеры чисел Рейнольдса *R*е = 8 700–28 000, вычислены значения аэродинамического сопротивления пылеуловителя и угловых скоростей в пристенной зоне сепарационной камеры, оказывающих определяющее значение на величину проскока пылевых частиц.

Натурные измерения величины коэффициента проскока проводились на действующих пылеуловителях в соответствии со стандартными методиками измерений в дисперсионных потоках НИИОГАЗ с использованием пневмометрических трубок Пито, микроманометров ММН – 250, электроаспираторов и фильтров АФА.

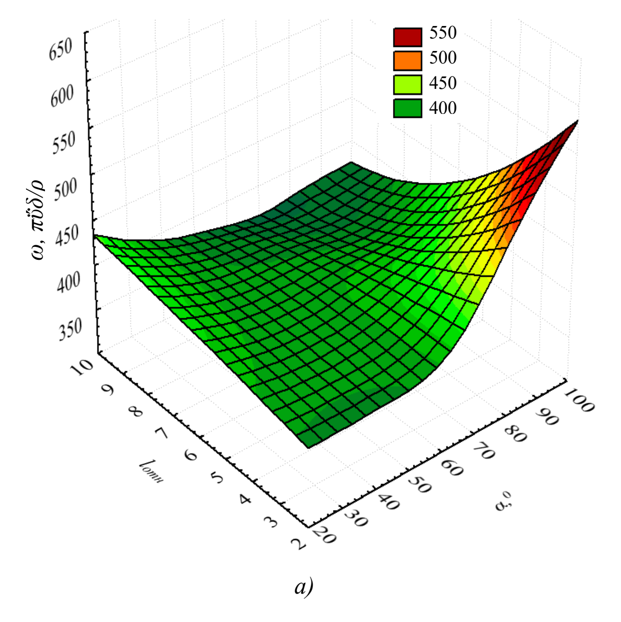
Результаты исследования. На рис. 7–9 (выполнены с применением среды численного моделирования SolidWorks) в виде поверхностей отклика представлены результаты расчетов значений угловых скоростей, полученные в ходе варьирования конструктивных характеристик нижнего ввода при *R*е = 8 700–28 000.



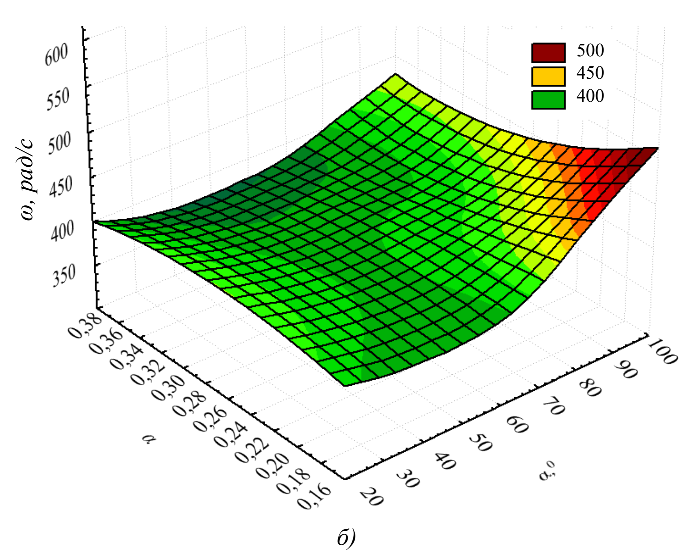
а)

б)

Рис. 7. Результаты вычислений значений угловой скорости ω, рад/с, при *R*e = 8 700:
а — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)

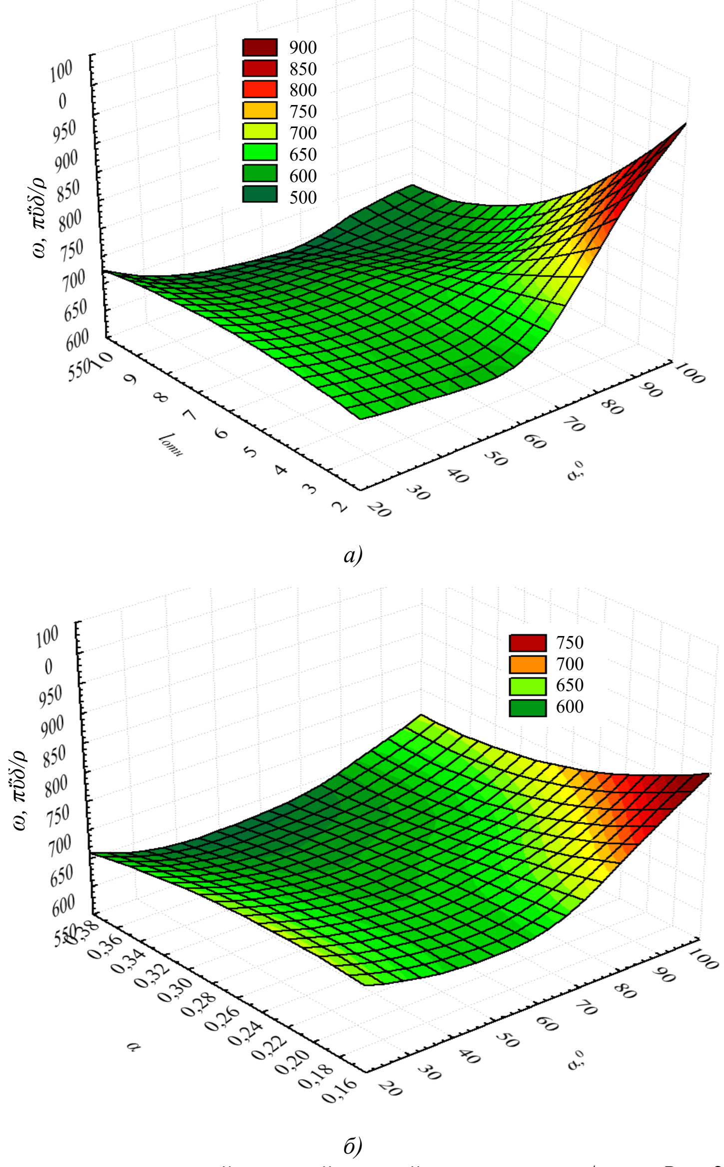


а)



б)

Рис. 8. Результаты вычислений значений тангенциальной скорости ω, рад/с, при *R*e = 17 900:
а — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)



а)

б)

Рис. 9. Результаты вычислений значений угловой скорости ω, рад/с, при *R*e = 28 000:
а — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)

На рис. 10 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks) представлено распределение значений тангенциальных скоростей газового потока по сечению сепарационной камеры на уровне среза выходного патрубка вторичного потока.

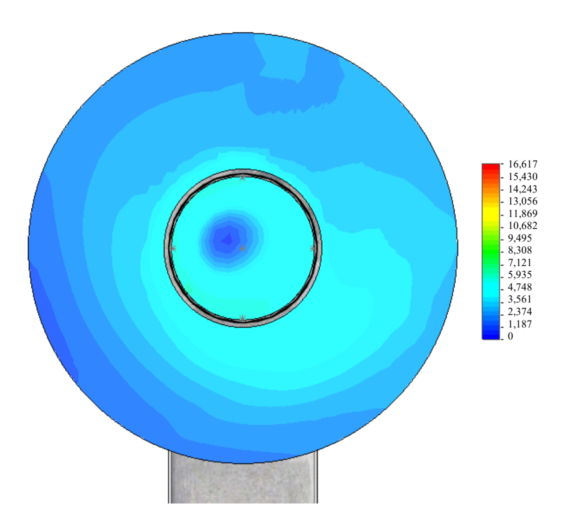


Рис. 10. Распределение значений тангенциальных скоростей газового потока по сечению сепарационной камеры на уровне среза выходного патрубка вторичного потока (м/с)

Для очистки пылевых выбросов железобетонного производства предложена конструкция пылеуловителя ВЗП с аксиальным подводом вторичного потока для применения на заводах ЖБИиК (рис. 11) [19].

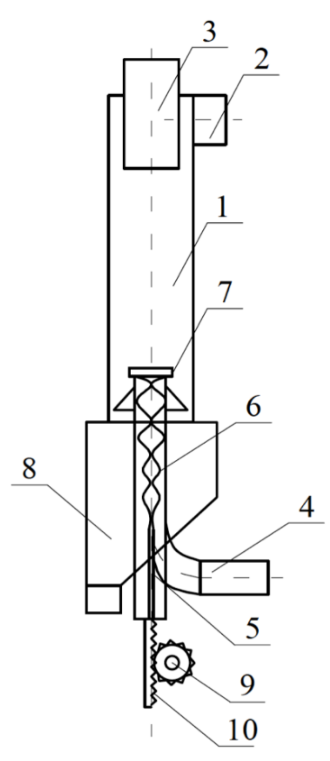


Рис. 11. Схема устройства вихревого пылеуловителя с завихрителем шнекового типа:
1 — цилиндрическая сепарационная камера; 2 — тангенциальный ввод очищаемого потока; 3 — коаксиальный выхлопной патрубок; 4 — аксиальный патрубок первичного ввода; 5 — закручиватель шнекового типа; 6 — шнековый завихритель; 7 — коническая отбойная шайба; 8 — бункер для сбора пыли; 9 — зубчатое колесо; 10 — зубчатая рейка [19]

На втором этапе были реализованы натурные измерения значений коэффициента проскока для мелкодисперсной пыли предприятий по производству железобетонных изделий на типовых пылеуловителях ВЗП и на аппарате предлагаемой конструкции. Зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований, приведены на рис. 12. Для сравнения на рисунке также приведены результаты, полученные при испытаниях ВЗП классической конструкции (кривая 4).

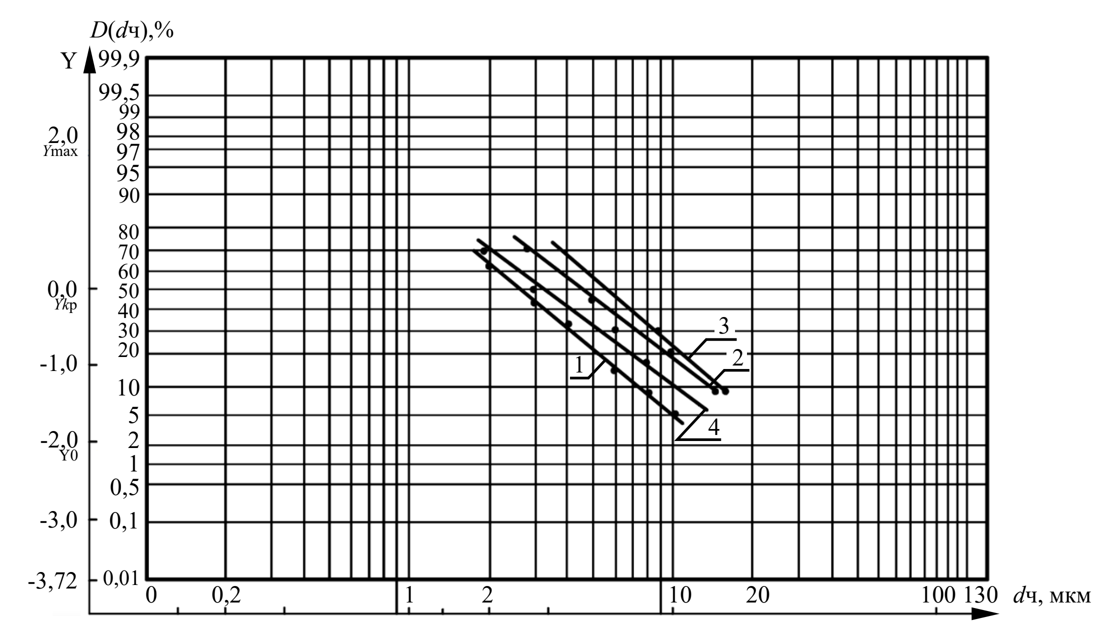


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований функций проскока у пылеуловителей ВЗП:
1 — ВЗП-200; 2 — ВЗП-400; 3 — ВЗП-600 с коаксиальным вводом; 4 — ВЗП-200 конструкции В.Д. Кононенко

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов, убедительно свидетельствуют в пользу предположения о наличии негативного влияния патрубка вторичного ввода на кинематическую структуру потока в нижней части сепарационной камеры пылеуловителей на встречных закрученных потоках. Из данных, представленных на рис. 10, следует, что ось вращения потока смещена от оси сепарационной камеры. Это приводит к снижению полезного действия вихревого эффекта, заключающегося в повышении интенсивности закрутки за счет взаимодействия однонаправленно закрученных потоков.

Несовпадение оси вращения закрученного потока с осью сепарационной камеры, являющейся также осью вращения первичного закрученного потока, формируемого верхним тангенциальным вводом, приводит к ощутимому повышению величины проскока пылевых частиц. Данный факт объясняется образованием паразитных завихрений на границах слияния некоаксиальных закрученных потоков. Следствием этого является унос уже уловленных или попавших в пристенную зону пылевых частиц. Будучи вырванными из пристенного потока, либо взметаемыми паразитным вихрем частицы пыли попадают во вторичный поток, и, в силу его оппозитной направленности, уносятся в патрубок чистого газа.

Следует отметить, что наиболее ярко данный эффект проявляется на частицах мелких фракций, для которых характерно существенное превалирование аэродинамических сил над массовыми. И именно данный факт делает задачу устранения негативного влияния вторичного патрубка, вносящего нежелательные искажения в течение вторичного закрученного потока, особенно актуальной в условиях применения аппаратов ВЗП в железобетонном производстве, для пылевых выбросов которого характерно наличие большой доли мелкодисперсных пылевых частиц.

Для устранения описанной проблемы предлагается применение коаксиального ввода вторичного потока (рис. 12) Основной особенностью предлагаемой конструкции вихревого пылеуловителя является применение коаксиального ввода вторичного закрученного потока, достигаемого посредством использования закручивателей шнекового типа. Применение такой компоновочной схемы позволяет оптимизировать движение закрученного потока в нижней части сепарационной камеры, а также снизить вероятность возникновения подсосов. Отсутствие радиального патрубка вторичного потока, перекрывающего часть живого сечения сепарационной камеры пылеуловителей ВЗП традиционной конструкции, позволяет избежать нежелательного нарушения кинематической структуры потока. Отсутствие паразитных завихрений потока в нижней части сепарационной камеры позволяет существенно понизить вторичный унос пылевых частиц, находящихся в пристеночной зоне течения, что, в свою очередь, снижает общую величину проскока пылевых частиц. Кроме того, применение коаксиальных вводов позволяет получить некоторое снижение аэродинамического сопротивления пылеуловителей ВЗП, повышая их энергоэффективность.

Предложенная конструкция коаксиального ввода вторичного закрученного потока позволяет решить поставленную задачу. Данный факт подтверждается результатами опытно-промышленных испытаний, результаты которых представлены на рис. 12. Кривая 3, характеризующая функцию проскока пылевых частиц в аппарате с коаксиальным вводом, расположена выше других, что свидетельствует о меньшем проскоке частиц всех фракций.

Таким образом, применение пылеуловителей на встречных закрученных потоках с коаксиальным вторичным вводом на предприятиях по производству железобетонных изделий позволяет добиться высокой степени очистки пылевых выбросов, не прибегая к дорогостоящей замене инерционных пылеуловителей устройствами иных типов.

Список литературы

1. Каздым А.А. Экологические проблемы древности — историческая ретроспектива. *История науки и техники.* 2007;(5):2–17. URL: http://www.heraldrsias.ru/download/articles/06___Article___Zhirkov.pdf (дата обращения: 12.09.2023).

2. Плачкова С.Г. Энергетика. История, настоящее и будущее. В кн. 5. *Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире.* 2011.

3. Akhbarifar Sepideh, Abghari Sorood, Shirvani Mansour, Akhbarifar Sanaz. *Improving dust removal of cyclones* In: Conference (ICEME 2011At). Orlando, Florida, USA: ICEME; 2011.

4. Pitak I., Briankin S., Pitak O., Shaporev V., Petrukhin S. Influence of the inlet flow swirler construction on hydrodynamics and efficiency of work. *Technology audit and production reserves.* 2017;5(3(37)):14–22. http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112786

5. Nowak K., Bukowska M. Influence of cyclone construction parameters on the efficiency of dust removal. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;603(5):05209 http://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052096

6. Азаров В.Н. *Пылеуловители со встречными закрученными потоками.* Монография. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2020. 140 с.

7. Baxodirova M.T., Kurbonov D., Badalov A.A., Jurayev R.R., Bekturdiyev G.K., Mahamatjanov M.A. Efficiency and pressure loss in apparatus with swirling flow. *The herald of KSUCTA.* 2022;76(2):320–325. http://doi.org/10.35803/1694-5298.2022.2.320-325

8. Badalova D.A. Swirling flow for dust capture. In: *E3S Web of Conferences.* 2023;401:03065. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103065

9. Schauffler E., Zenneck H. *Вихревая камера для отделения твердых и жидких аэрозольных частиц с помощью вспомогательного закручивающего потока газа*. Патент ФРГ, № 1092281. 1953.

10. Кононенко В.Д. *Совершенствование пылеулавливающих аппаратов в промышленности технического углерода.* Москва: ЦНИИТЭнефтехим; 1985. 78 с.

11. Ганчуков В.И., Екимова А.В. *Вихревые аппараты со встречными закрученными потоками.* Череповец: ЧерГУ; 1998. 33 с.

12. Жукова Н.С., Кондратенко Т.О., Шибаков В.А. Анализ конструктивных элементов аппарата ВЗП в инженерно-экологических системах. *Письма в международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология».* 2014;(1):36–38. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-elementov-apparata-vzp-v-inzhenerno-ekologicheskih-sistemah-1/viewer (дата обращения: 19.08.2023).

13. Богуславский Е.И., Азаров В.Н., Сергина Н.М. Математическая модель процесса улавливания в пылеуловителях со встречными закрученными потоками с отсосом из нижней зоны аппарата. В: *Труды Международной науч.-практ. конф. «Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов».* Волгоград: ВолГАСА; 1999. С. 79–80.

14. Azarov V.N., Lukanin D.V., Borovkov D.P., Redhwan A.M. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME).* 2014;8(5):851–856. https://doi.org/10.15866/ireme.v8i5.3455

15. Sergina N.M., Sakharova A.A., Azarov V.N., Azarov D.V., Nikolenko M.A. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF). In: *E3S Web of Conferences. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development" (CATPID-2019).* Kislovodsk: E3S Web of Conferences. 2019;38(5):01037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801037

16. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Borovkov D.P. Experimental optimization of dust collecting equipment parameters of counter swirling flow with coaxial leadthrough for air ventilation system and dust elimination. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Yurga: Publishing Ltd IOP; 2019;224(1):012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/224/1/012037

17. Лупиногин В.В., Азаров В.Н., Сахарова А.А., Николенко М.А., Ковтунов И.А., Мартынова Е.В. *Вихревой пылеуловитель.* Патент РФ, № 191631. 2019. 6 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU191631U1_20190814.pdf (дата обращения: 24.08.2023).

18. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Borovkov D.P., Poliakov I.V. Swirling devices intended for use in air ducts of dust emissions cleaning systems. In: *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering "(AIME 2018). Series: Advances in Engineering Research (AER).* Novosibirsk: Atlantis Press; 2018. Vol. 157. P. 60–64. https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.12

19. Азаров А.В., Сергина Н.М., Евтушенко А.И., Ковтунов И.А., Стреляева А.Б., Азаров Д.В. *Вихревой пылеуловитель.* Патент РФ, № 202744U1. 2021. 6 с. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/25/2d/2856e5fb81fbb8/RU202744U1.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

References

1. Kazdym AA. Ecological problems of antiquity — historical retrospective. *History of Science and Engineering.* 2007;(5):2–17. URL: http://www.heraldrsias.ru/download/articles/06___Article___Zhirkov.pdf (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

2. Plachkova SG. Energetika. Istoriya, nastoyashchee i budushchee. In book 5. *Elektroenergetika i okhrana okruzhayushchei sredy. Funktsionirovanie energetiki v sovremennom mire.* 2011. (In Russ.).

3. Akhbarifar Sepideh, Abghari Sorood, Shirvani Mansour, Akhbarifar Sanaz. Improving dust removal of cyclones. In: *Conference (ICEME 2011At)*. Orlando, Florida, USA: ICEME; 2011.

4. Pitak I, Briankin S, Pitak O, Shaporev V, Petrukhin S. Influence of the inlet flow swirler construction on hydrodynamics and efficiency of work. *Technology audit and production reserves.* 2017;5(3(37)):14–22. http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112786

5. Nowak K, Bukowska M. Influence of cyclone construction parameters on the efficiency of dust removal. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;603(5):05209 http://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052096

6. Azarov VN. *Pyleuloviteli so vstrechnymi zakruchennymi potokami.* Monograph. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2020. 140 p. (In Russ.).

7. Baxodirova MT, Kurbonov D, Badalov AA, Jurayev RR, Bekturdiyev GK, Mahamatjanov MA. Efficiency and pressure loss in apparatus with swirling flow. *The herald of KSUCTA.* 2022;76(2):320–325. http://doi.org/10.35803/1694-5298.2022.2.320-325

8. Badalova DA. Swirling flow for dust capture. In: *E3S Web of Conferences.* 2023;401:03065. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103065

9. Schauffler E, Zenneck H. *Vikhrevaya kamera dlya otdeleniya tverdykh i zhidkikh aerozol'nykh chastits s pomoshch'yu vspomogatel'nogo zakruchivayushchego potoka gaza.* Patent of West Germany, No. 1092281. 1953. (In Russ.).

10. Kononenko VD. *Sovershenstvovanie pyleulavlivayushchikh apparatov v promyshlennosti tekhnicheskogo ugleroda.* Moscow: TsNIITEneftekhim; 1985. 78 p. (In Russ.).

11. Ganchukov VI, Ekimova AV. *Vikhrevye apparaty so vstrechnymi zakruchennymi potokami.* Cherepovets: CherSU; 1998. 33 p. (In Russ.).

12. Zhukova NS, Kondratenko TO, Shibakov VA. Analysis of structural elements of vortex dust collector with colliding twisted flows in engineering and environmental systems. *Alternative energy and ecology.* 2014;(1):36–38. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-elementov-apparata-vzp-v-inzhenerno-ekologicheskih-sistemah-1/viewer (accessed: 19.08.2023). (In Russ.).

13. Boguslavskii EI, Azarov VN, Sergina NM. Matematicheskaya model' protsessa ulavlivaniya v pyleulovitelyakh so vstrechnymi zakruchennymi potokami s otsosom iz nizhnei zony apparata. In: *Trudy Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. "Ekologicheskaya bezopasnost' i ekonomika gorodskikh i teploenergeticheskikh kompleksov".* Volgograd: VolGASA; 1999. P. 79–80. (In Russ.).

14. Azarov VN, Lukanin DV, Borovkov DP, Redhwan AM. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME).* 2014;8(5).851–856. https://doi.org/10.15866/ireme.v8i5.3455

15. Sergina NM, Sakharova AA, Azarov VN, Azarov DV, Nikolenko MA. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF). In: *E3S Web of Conferences. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development" (CATPID-2019).* Kislovodsk: E3S Web of Conferences. 2019;38(5):01037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801037

16. Stefanenko IV, Azarov VN, Borovkov DP. Experimental optimization of dust collecting equipment parameters of counter swirling flow with coaxial leadthrough for air ventilation system and dust elimination. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Yurga: Publishing Ltd IOP; 2019;224(1):012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/224/1/012037

17. Lupinogin VV, Azarov VN, Sakharova AA, Nikolenko MA, Kovtunov IA, Martynova EV. *Vikhrevoi pyleulovitel'*. Patent RF, No. 191631. 2019. 6 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU191631U1_20190814.pdf (accessed: 24.08.2023). (In Russ.).

18. Stefanenko IV, Azarov VN, Borovkov DP, Poliakov IV. Swirling devices intended for use in air ducts of dust emissions cleaning systems. In: *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering "(AIME 2018). Series: Advances in Engineering Research (AER).* Novosibirsk: Atlantis Press; 2018. Vol. 157. P. 60–64. https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.12

19. Azarov AV, Sergina NM, Evtushenko AI, Kovtunov IA, Strelyaeva AB, Azarov DV. *Vikhrevoi pyleulovitel'*. Patent RF, No. 202744U1. 2021. 6 p. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/25/2d/2856e5fb81fbb8/RU202744U1.pdf (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 29.09.2023
Поступила после рецензирования 20.10.2023
Принята к публикации 31.10.2023

Об авторах:

Бесарион Чохоевич Месхи, доктор технических наук, профессор, ректор Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 5473-2850, AuthorID, ResearcherID, ScopusID, ORCID

Александр Иванович Евтушенко, кандидат технических наук, доцент, декан факультета промышленного и гражданского строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов–на–Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7523-1831, AuthorID, ORCID, ScopusID, a.evtushenko@mail.ru

Дмитрий Павлович Боровков, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве Волгоградского государственного технического университета (400074, РФ, г. Волгоград, ул. Академическая, 1), SPIN-код: 4511-5510, AuthorID, ORCID, friggate@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:
Б.Ч. Месхи — формирование основной концепции, научное руководство.
А.И. Евтушенко — задачи исследования, корректировка выводов.
Д.П. Боровков — анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.09.2023
Revised 20.10.2023
Accepted 31.10.2023

About the Authors:

Besarion Ch. Meskhi, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 5473-2850, Author ID, ORCID, ScopusID

Aleksandr I. Evtushenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Industrial and Civil Engineering Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7523-1831, AuthorID, ORCID, ScopusID, a.evtushenko@mail.ru

Dmitry P. Borovkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Life Safety in Construction and Urban Economy Department, Volgograd State Technical University (1, Akademicheskaya Str., Volgograd, 400074, RF), SPIN-code: 4511-5510, AuthorID, ORCID, friggate@yandex.ru

Claimed contributorship:
BCh Meskhi: formulation of the basic concept, academic advising.
AI Yevtushenko: research objectives, correction of the conclusions.
DP Borovkov: analysis of the research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.